

Досліджено вплив сухих сумішей покриття з неорганічних та органічних речовин на ефективність захисту деревини від дії полум'я магнію. Встановлено, що сухі суміші на органічній основі з додаванням мінеральних наповнювачів, під дією високої температури виділяють у навколишнє середовище газу, які ізолюють горючий метал від доступу кисню, утворюють покрив та припиняють горіння

Ключові слова: горіння металу, втрата маси, обуглювання, захисні засоби деревини, вогнегасні порошки

Исследовано влияние сухих смесей покрытий из неорганических и органических веществ на эффективность защиты древесины от воздействия пламени магния. Установлено, что сухие смеси на органической основе с добавлением минеральных наполнителей под действием высокой температуры выделяют в окружающую среду газы, которые изолируют горючий металл от доступа кислорода, образуют покров и прекращают горение

Ключевые слова: горение металла, потеря массы, обугливание, защитные средства древесины, огнетушащие порошки

ВПЛИВ СУХИХ СУМІШЕЙ ПОКРИТТЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАХИСТУ ДЕРЕВИНИ ВІД ДІЇ ПОЛУМ'Я МАГНІЮ

Ю. В. Цапко

Доктор технічних наук*

Науково-дослідний інститут в'язучих речовин і матеріалів ім. В. Д. Глуховського

Київський національний університет будівництва і архітектури

пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037

E-mail: juriyts@ukr.net

О. Ю. Цапко

Аспірант*

E-mail: alekseysapko@gmail.com

*Національний університет біоресурсів і природокористування України

вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041

1. Вступ

Одним з найбільш значимих факторів ризику об'єктів зберігання вибухонебезпечних виробів є пожежо-небезпека. Від вибору систем забезпечення протипожежного захисту таких об'єктів залежить живучість як в нормальних умовах, так і при виникненні надзвичайної ситуації. Тому проблема, що пов'язана з використанням горючих матеріалів (деревини, фанери, паперу) у будівельних конструкціях і пакувальних виробках, набула ще більш актуального характеру і виявила низький рівень безпеки експлуатації.

Основним матеріалом для виготовлення будівельних конструкцій на військових об'єктах є деревина, яка за групою горючості відноситься до групи горючих матеріалів середньої займистості. Вогнезахисне оброблення сучасними ефективними засобами може значно вплинути або виключити виникнення пожежі та руйнування конструкції. Зокрема, покриття надає деревині здатності протистояти дії полум'я, поширенню полум'я поверхнею, в запобіганні вільному доступу кисню, який сприяє прискоренню процесу горіння та його послідовному затуханню.

На складах боеприпасів на Запоріжжі (Україна) 17 лютого 2016 близько 20:20 почалися вибухи. Невідомі особи за допомогою безпілотних літальних апаратів скинули запальні предмети на територію об'єкта. В результаті цього виникли осередки загорання, які складно було загасити. Окремі частинки магнію потрапляли

під дерев'яні ящики, в яких зберігались боеприпаси. Для гасіння неможливо було використовувати воду, тому що вона неефективна при гасінні цих об'єктів.

Встановлено, що необроблений зразок деревини здатний до займання та поширення полум'я поверхнею після запалювання, що призводить до руйнування конструкції [1]. Застосування неорганічних покриттів дозволяє сповільнити прогрівання матеріалу і зберігати свої функції при пожежі протягом заданого періоду часу, але потребує значних витрат [2, 3].

Ефективність застосування вогнезахисних покриттів направлена на створення інтумесцентних матеріалів на поверхні, що діють за принципом істотного зниження теплопровідності, за рахунок утворення ними покриттів. В результаті цих перетворень при інтенсивному тепловому впливі в пінококсіві ніздрюваті шари, значно відсуваються у часі як момент загорання горючих конструкцій з дерева, так і нагрівання протягом заданого часу виробів до неприпустимо високих температур.

Враховуючи, що широко використовуються металеві запальовальні суміші, які здатні при горінні виділяти температуру понад 2200 °C та запалювати горючі матеріали, зокрема, деревину. І в результаті чого постає необхідність захисту деревини від дії таких температур, встановлення ефективності вогнезахисту покриттів, а також проблема ліквідації самих осередків горіння.

Тому дослідження ефективності гасіння, впливі компонентів, які входять до їх складу, на цей процес

є невирішеною складовою забезпечення живучості та визначають необхідність розроблення спеціальних вогнегасних засобів. Це і обумовило необхідність проведення досліджень у даному напрямку.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Враховуючи, що значна кількість вибухопожежо-небезпечних виробів зберігається у дерев'яній тарі, постає питання, як запобігти загоранню і вибуху від запалювальних речовин, у тому числі від металевих запалювальних сумішей, які характеризуються високою температурою.

На сьогодні встановлено, що магнієві сплави широко використовують для виготовлення підпалювальних гранат, які провокують виникнення комбінованих пожеж (класу А, В, D) [4].

Особливість вогнезахисту дерев'яних будівельних конструкцій сучасними засобами полягає в створенні на поверхні елементів теплоізолюючих екранів, що витримують високі температури й безпосередню дію вогню і дозволяють зберігати свої функції протягом заданого періоду часу [5].

Опис поведінки спучувальних покриттів в момент формування пористої структури є окремим і складним завданням, охоплює обидві стадії процесу теплозахисту: як спучування покриття, так і подальший теплоперенос, який утворюється при спученні [5, 6]. Тому постає необхідність дослідження умов утворення бар'єру для теплопровідності та встановлення механізму дії покриття з утворенням шару коксу.

Для ліквідації полум'я магнію та його сплавів використовуються вогнегасні порошкові склади спеціального призначення, які покривають вогнище горіння, що перешкоджає доступу кисню повітря в зону горіння. Але такі речовини малоефективні та потребують значної кількості для ліквідування загорання, окрім того займання може виникнути у важкодоступних місцях. Встановлено, що для підвищення ефективності процесу гасіння пожеж магнієвих сплавів є необхідним комплексний підхід до гасіння з розробленням нових методів і способів їх гасіння та виготовлення відповідних технічних засобів [7].

Сучасні методи вогнезахисту включають використання покриттів, що спучуються, які являють собою складні системи органічних і неорганічних компонентів та характеризуються високою інтумісцентною здатністю. Ефективність застосування компонентів покриття на основі органічних речовин показана в роботі [8], де за рахунок дії антипіренів на основі поліфосфорних кислот та спіновачів можливо значно впливати на формування захисного шару пінококсу. Значне підвищення стійкості, щільності і міцності захисного шару досягається внаслідок направленої формування тих чи інших добавок, які утворюють високотемпературні сполуки [9].

Тому перспективним напрямком досліджень є підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій за допомогою вогнезахисних засобів. У більшості випадків їх модифікують полімерними комплексами і антипіренами, однак такі покриття відносяться до матеріалів, що легко вимиваються і придатні для внутрішніх приміщень [10, 11].

Вплив неорганічних наповнювачів на вогнезахисне покриття показав свою ефективність, однак робота покриття при цьому не вказана та не виявлені зміни теплопровідності при переході покриття у кокс [12, 13]. Автори показали лише аналітичну модель для розрахунку теплопровідності захисного шару пінококсу при роботі покриття, яка враховує форми пір, але які перетворення у матеріалі відбуваються за температур горіння невідомо.

При створенні композицій для гасіння металів враховуються такі чинники:

- основна речовина не повинна містити в молекулі атом кисню (не підтримувати горіння), а також адсорбовану воду та вступати з металом в хімічну реакцію інгібування;

- порошкові склади повинні мати певний фракційний склад, не повинні злежуватися в процесі зберігання, що досягається включенням до складу гідрофобізуючих добавок.

Основним завданням досягнення позитивного результату при ліквідації горіння магнію є створення за допомогою сухих сумішей захисного повного покриття вогнища горіння, що перешкоджає доступу кисню повітря в зону горіння. Таке покриття має бути досить щільним, мати необхідну товщину шару порошку по всій поверхні осередку горіння, що досягається при певній питомій витраті порошку.

Гасіння магнію та його сплавів проводять шляхом засипання палаючого магнію великою кількістю сухого графіту, або флюсу, який використовується при плавлі магнієвих сплавів. Також можливе застосування трихлориду бору для гасіння магнієвого полум'я, який взаємодіє з палаючим магнієм, утворюючи хлорид магнію, що ізолює поверхню від доступу повітря до палаючої поверхні. Або засипання палаючого магнію сухим пилоподібним карналітом або піском [14]. Вогнегасні порошки, які випускаються в Україні, не придатні для гасіння пожеж магнію, як і пісок.

Тому важливим питанням є встановлення ефективності вогнезахисту при дії вищезазначених температур та впливі компонентів, які входять до складу, і встановлення ролі у забезпеченні вогнестійкості. Дослідження механізмів взаємодії речовин з полум'ям металу дозволить розробляти ефективні способи та засоби гасіння пожеж таких класів, що і обумовлюють необхідність проведення досліджень у цьому напрямі.

3. Мета і задачі досліджень

Проведені дослідження ставили за мету визначити особливості ліквідації полум'я магнію при обробленні покриттями різної природи, а також встановити ефективність застосування сухих сумішей до гасіння високої температури горіння металевих речовин.

Для досягнення мети вирішувались наступні задачі:

- визначити при температурному впливі особливості вогнезахисту деревини при обробленні покриттями на основі неорганічних та органо-мінеральних речовин;

- встановити ефективність сухих сумішей, що входять у покриття, до гасіння високої температури горіння металевих речовин.

4. Матеріали та методи дослідження

4.1. Досліджувані матеріали та обладнання, які використовувались в експерименті

Дослідження проводили з використанням системи сухих сумішей, що складається з поліфосфату амонію (ПФА), меламіну, пентаеритриту (ПЕР) та мінеральних наповнювачів – алюмосилікатних мікросфер, перліту, базальтової чешуї, металургійного шламу, золи.

Експериментальні зразки покриттів деревини готували на основі органо-неорганічної системи, що містить 18÷20 % ПФА, 12÷14 % меламіну, 10÷12 % ПЕР та в'язучого, що складається з 16 % ПВА-дисперсії та води. Для покриття деревини наведену органо-неорганічну масу перемішували, вводили наповнювачі у кількості 10 % і наносили на дерев'яні зразки, які виготовляли з деревини товщиною дошки 19 мм середніми розмірами 190×155 мм і висотою 140 мм, вогнезахиснені модельні зразки дерев'яної тари для зберігання озброєння та боеприпасів було оброблено вогнезахисними покриттями на органічній основі з додаванням: алюмосилікатних мікросфер, перліту, базальтової чешуї, металургійного шламу, золи (рис. 1).



Рис. 1. Модельні зразки тари для зберігання озброєння та боеприпасів, які було оброблено вогнезахисним покриттям на органічній основі з додаванням:

1 – алюмосилікатних мікросфер; 2 – перліту; 3 – базальтової чешуї; 4 – металургійного шламу; 5 – золи

У якості пального використовувалась магнієва стружка, при горінні якої виділяється температура 2200 °C [15].

Для гасіння модельного вогнища полум'я магнію використовували систему сухих сумішей, що містить 18 % ПФА, 12 % меламіну, 10 % ПЕР. Отриману масу перемішували, вводили наповнювачі у кількості 10 %, а саме алюмосилікатні мікросфери, перліт, базальтову чешую, металургійний шлам, зола. Отриману суху масу використовували для ізоляції полум'я магнію.

4.2. Методика визначення показників властивостей зразків

Визначення вогнезахисної ефективності тари виготовленої з деревини проводили за робочою методикою, суть якої полягала у експериментальному визначенні ефективності вогнезахисту дерев'яної конструкції

обробленої покриттям, а саме у впливі на зразок полум'я магнію (модель тверда запалювальна речовина) з заданими параметрами та реєструванні прогорання і втрати маси зразка після випробування.

У зразок тари встановлювали піропатрони. На кришку та під зразок поміщали запалювальну суміш 10 г на 1 дм² поверхні. Підпалювали пальне і зразок дерев'яної тари витримували у полум'ї пального протягом часу вигорання та до відсутності самостійного горіння і тління. Контролювався час спрацювання піропатронів.

Критерієм визначення ефективності вогнезахисту тари є відповідність значення показника втрати маси тари, яка повинна становити не більше 10 %, а також остаточне горіння після вигорання пального, прогорання матеріалу та час спрацювання піропатронів.

Визначення вогнегасної ефективності сухих сумішей покриття проводили за робочою методикою, суть якої полягала у експериментальному визначенні кількісного показника втрати маси порошку потраченого на гасіння. На зразок полум'я магнію (модель тверда запалювальна речовина) подавали вогнегасну суміш з заданими параметрами та реєстрували час до тушіння і втрату маси зразка, яка пішла на гасіння після випробування.

У сталевий круглий піддон діаметром 80 мм і глибиною 40 мм засипали магнієву стружку масою 10 г. Зразок підпалювали від проміжного запалювального складу. Після того як 90–95 % площі поверхні зразка запалало, проводили гасіння. Досліджуваний склад насипали з совка на поверхню, що горить рівномірно. Визначалася витрата порошку і стан осередку пожежі через 5 хвилин після гасіння та розраховували інтенсивність подавання вогнегасної суміші.

5. Результати досліджень впливу сухих сумішей покриття на ефективність полум'я магнію

Для встановлення ефективності вогнезахисту деревини були проведені натурні випробування на об'єктах, зокрема модельних зразках дерев'яних конструкцій.

На рис. 2 показано результати випробувань необробленого зразка та покриттів деревини з додаванням алюмосилікатних мікросфер, перліту, базальтової чешуї, шламу та золи.

Під час випробувань горіння магнієвої стружки було встановлено утворення на поверхні матеріалу шару шлаку, під яким продовжувався процес термічного розкладу деревини і залежно від властивостей покриття його припинення проходило по різному та позначилось на глибині обвуглювання.

В табл. 1 приведено результати втрати маси та час горіння модельного вогнища дерев'яної тари для зберігання вибухонебезпечних виробів.

У результаті проведених випробувань встановлено, що глибина обвуглювання необробленої деревини сягала 16÷20 мм. Для модельного зразка обробленого захисним покриттям з додаванням мінеральних речовин зафіксовано спучення захисного покриття на під час взаємодії з полум'ям та відбулося обвуглення деревини під шаром покриття на глибину лише 5–6 мм відповідно.

Проведено дослідження при гасінні полум'я магнію вогнем піском та встановлено значне підвищення інтенсивності горіння (рис. 3).

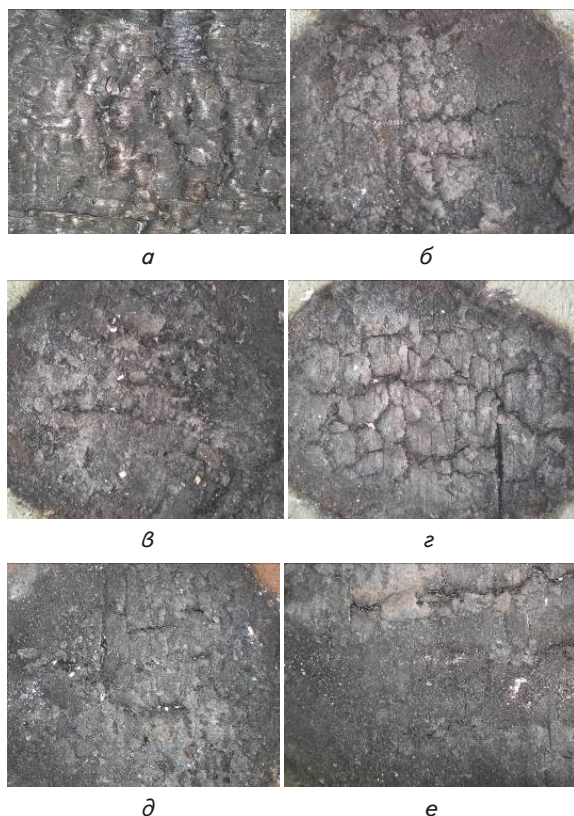


Рис. 2. Результати глибини обвуглювання кришки дерев'яної конструкції: *а* – необроблений; оброблений: *б* – покриттям на органічній основі з додаванням алюмосилікатних мікросфер, *в* – покриттям на органічній основі з додаванням перліту, *г* – покриттям на органічній основі з додаванням базальтової чешуї, *д* – покриттям на органічній основі з додаванням шламу, *е* – покриттям на органічній основі з додаванням золи

Таблиця 1
Результати випробувань дерев'яної тари для зберігання вибухонебезпечних виробів

Моделльний зразок тари для випробувань оброблений покриттям з додаванням	Маса зразка, кг		Час горіння зразка, с	Втрата маси зразка після випробувань Δm , %	Глибина обвуглювання, мм
	До	Після випробувань			
необроблений	1,620	0,972	1301	40,0	16÷20
алюмосилікатних мікросфер	1,874	1,785	567	4,75	4÷5
перліту	1,861	1,754	783	5,75	5÷6
базальтової чешуї	1,569	1,498	447	4,52	3÷4
металургійного шламу	1,761	1,671	552	5,11	4÷5
золи	1,621	1,539	501	5,05	5÷5,5

Якщо компоненти покриття здатні протистояти полум'ю магнію, то вони вочевидь здатні до гасіння пожеж металів. Для встановлення ефективності гасіння полум'я магнію були проведені відповідні дослідження.

На рис. 4 показано результати випробувань зразка суміші на органічній основі з додаванням мінеральних речовин.

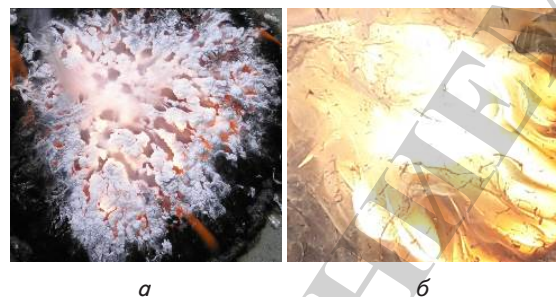


Рис. 3. Результати гасіння полум'я магнію вологим піском: *а* – горіння магнію; *б* – попадання вологого піску в полум'я магнію



Рис. 4. Результати випробувань гасіння полум'я магнію модельним зразком сухих сумішей покриття з додаванням мінеральних речовин: *а* – займання магнію, *б* – гасіння полум'я, *в* – утворення на поверхні горючої речовини теплоізолювального шару, *г* – результати гасіння

Інтенсивність подавання:

$$I = \frac{G}{\tau} = \frac{m}{S \cdot \tau}, \quad (1)$$

де G – загальна кількість вогнегасної речовини, що витрачається під час гасіння пожежі на одиницю розрахункового параметра пожежі, г/см²; τ – час гасіння пожежі, с; m – маса вогнегасної речовини, г; S – площа горіння пожежі, м².

В табл. 2 приведено результати втрати маси та час гасіння модельного вогнища.

З результатів вказаних в табл. 2 встановлено, що зразки сухих сумішей покриття з додаванням алюмосилікатних мікросфер, перліту, базальтової чешуї, металургійного шламу та золи у кількості 10 % показали інтенсивність подавання порошку при гасінні полум'я магнію в межах 0,034÷0,041 г/(см²·с), що значно нижче інтенсивності подавання хлориду натрію, що становить 0,044 г/(см²·с) [7]. Утворюючи хімічні з'єднання з горючим магнієм сухі суміші

покриття припиняють доступ повітря до палаючої поверхні.

Таблиця 2

Гасінню полум'я магнію сумішами на основі органічних речовин з мінеральними добавками

Суміші на основі органічних речовин з додаванням	Маса зразка вогнегасного порошку, г		Час гасіння полум'я магнію, с	Інтенсивність подавання, г/(см ² ·с)	Результат гасіння (погашено, не погашено)
	До випробувань	Після випробувань			
алюмосилікатних мікросфер	22,1	14,7	3,4	0,034	Погашено
перліту	22,0	12,1	4,1	0,038	Погашено
базальтової чешуї	22,2	16,7	2,8	0,031	Погашено
металургійного шламу	22,2	10,2	4,6	0,041	Погашено
золи	22,1	11,8	4,1	0,039	Погашено

6. Обговорення результатів досліджень впливу сухих сумішей покриття на процес гасіння полум'я магнію

При роботі вогнезахисного покриття під термічною дією високотемпературного полум'я магнію, на що вказують результати досліджень (рис. 2, табл. 1), є закономірним процес спучення покриття. Під дією температури проходить процес розкладу сухих сумішей покриття з виділенням великої кількості інертних газів і утворенням теплоізолювального шару, які уповільнюють процеси тепло переносу до структури деревини і її руйнування. Слід зазначити, що присутність добавок 10 % (алюмосилікатні мікросфери, перліт, базальтова чешуя, металургійний шлам, зола), призводить до зшивання шару пінококсу за рахунок утворення тугоплавких сполук та відповідно до покращення стійкості до полум'я магнію. Вочевидь такий механізм впливу добавок є фактором регулювання ступеня стійкості коксу і ефективності теплоізолювання матеріалу. Це погоджується з даними, відомими з робіт [6, 9], автори яких теж пов'язують зміну процесу спучення при додаванні мінеральних наповнювачів. На відміну від результатів досліджень [11, 12], отримані дані щодо впливу наповнювачів на процес переходу покриття у спінений шар коксу і зміни теплоізолювальних властивостей дозволяють стверджувати наступне:

– основним регулятором процесу є не тільки формування шару пінококсу, а і термостійкість вогнезахисного покриття;

– суттєвий вплив на процес фазового переходу вогнезахисного покриття у спучений шар пінококсу здійснює правильне додавання мінеральних наповнювачів.

Дослідженнями встановлено, що магній згоряє у вологому середовищі з вибухом. При взаємодії з водою виділяє горючі гази і велику кількість тепла (рис. 3). Тому при розробленні вогнегасних сумішей доводимо висновку, що гасіння магнію потребує нових вогнегасних складів. Результати визначення ефективності гасіння полум'я магнію сухими сумішами покриття (рис. 4, табл. 2) вказують на неоднозначний вплив наповнювачів на змінення інтенсивності подавання. Така невизначеність не може бути вирішена в рамках приведеного дослідження, бо для цього потрібно було б провести додаткові експерименти з метою отримання більш достовірних даних. Зокрема, це передбачає наявність даних, достатніх для якісного проведення процесу гасіння та виявлення на його основі моменту часу, з якого починається падіння температури полум'я. Таке виявлення дозволить дослідити перетворення сухих сумішей покриття, що ізолює палаючу поверхню металу з утворенням сполук, та визначити ті змінні, що суттєво впливають на початок перетворення цього процесу.

Дана робота є продовженням досліджень, наведених у [1–3], де в повній мірі приведено механізм утворення пінококсу, його переміщення та здійснення теплоізолювання високої температури.

7. Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено особливості протидії полум'я магнію речовин різного походження та встановлено ефективність застосування сухих сумішей покриття до ліквідації високої температури горіння магнію, зокрема:

– при роботі вогнезахисного покриття під термічною дією високотемпературного полум'я магнію проходить процес розкладу сухих сумішей покриття з виділенням великої кількості інертних газів і утворенням теплоізолювального шару. Глибина обвуглювання необробленої деревини сягала 16÷20 мм, при обробленні захисним покриттям обвуглення досягло на глибину 5÷7 мм відповідно;

– випробування на модельних зразках при гасінні полум'я магнію показали, що при взаємодії з водою та вологими речовинами виділяє горючі гази і велику кількість тепла. Натомість зразки сухих сумішей покриття з додаванням алюмосилікатних мікросфер, перліту, базальтової чешуї, металургійного шламу та золи у кількості 10 % показали інтенсивність подавання порошку при гасінні полум'я магнію в межах 0,034÷0,041 г/(см²·с), що значно перевищує інтенсивність подавання хлориду натрію, що використовується для гасіння пожеж. При цьому сухі суміші покриття утворюють хімічні з'єднання з горючим магнієм, припиняють доступ повітря до палаючої поверхні.

Література

1. Tsapko, Y. Evaluation of effectiveness of wood fire protection upon exposure to flame of magnesium [Text] / Y. Tsapko, S. Guzii, M. Remenets, A. Kravchenko, O. Tsapko // Eastern-European Journal Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 4, Issue 10 (82). – P. 31–36. doi: 10.15587/1729-4061.2016.73543
2. Kryvenko, P. Determination of the effect of fillers on the intumescent ability of the organic-inorganic coatings of building constructions [Text] / P. Kryvenko, Y. Tsapko, S. Guzii, A. Kravchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 5, Issue 10 (83). – P. 26–31. doi: 10.15587/1729-4061.2016.79869

3. Tsapko, J. Simulation of the phase transformation front advancement during the swelling of fire retardant coatings [Text] / J. Tsapko, A. Tsapko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, Issue 11 (86). – P. 50–55. doi: 10.15587/1729-4061.2017.73542
4. Ковалишин, В. В. Проблеми гасіння магнію та його сплавів [Текст] / В. В. Ковалишин, О. Л. Мірус, В. М. Марич, В. В. Ковалишин, Р. Я. Лозинський // Пожежна безпека: Збірник наукових праць ЛДУ БЖД. – 2016. – № 28. – С. 58–63.
5. Tsapko, Y. Establishment of the mechanism and fireproof efficiency of wood treated with an impregnating solution and coatings [Text] / Y. Tsapko, A. Tsapko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, Issue 10 (87). – P. 50–55. doi: 10.15587/1729-4061.2017.102393
6. Ненахов, С. А. Физико-химия вспенивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония (обзор литературы) [Текст] / С. А. Ненахов, В. П. Пименова // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. – С. 11–58.
7. Ковалишин, В. В. Дослідження хімічних речовин, як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів [Текст] / В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Я. Б. Кирилів, В. В. Кошеленко, О. Л. Мірус // Пожежна безпека: Збірник наукових праць ЛДУ БЖД. – 2016. – № 29. – С. 46–56.
8. Carosio, F. Oriented Clay Nanopaper from Biobased Components – Mechanisms for Superior Fire Protection Properties [Text] / F. Carosio, J. Kochumalayil, F. Cuttica, G. Camino, L. Berglund // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2015. – Vol. 7, Issue 10. – P. 5847–5856. doi: 10.1021/am509058h
9. Krüger, S. Neue Wege: Reaktive Brandschutzbeschichtungen für Extrembedingungen [Text] / S. Krüger, G. J. G. Gluth, M.-B. Watolla, M. Morys, D. Häßler, B. Schartel // Bautechnik. – 2016. – Vol. 93, Issue 8. – P. 531–542. doi: 10.1002/bate.201600032
10. Xiao, N. Effects of Complex Flame Retardant on the Thermal Decomposition of Natural Fiber [Text] / N. Xiao, X. Zheng, S. Song, J. Pu // BioResources. – 2014. – Vol. 9, Issue 3. doi: 10.15376/biores.9.3.4924-4933
11. Nine, M. J. Graphene-Borate as an Efficient Fire Retardant for Cellulosic Materials with Multiple and Synergetic Modes of Action [Text] / M. J. Nine, D. N. H. Tran, T. T. Tung, S. Kabiri, D. Losic // ACS Applied Materials & Interfaces. – 2017. – Vol. 9, Issue 11. – P. 10160–10168. doi: 10.1021/acsami.7b00572
12. Cirpici, B. K. Assessment of the thermal conductivity of intumescent coatings in fire [Text] / B. K. Cirpici, Y. C. Wang, B. Rogers // Fire Safety Journal. – 2016. – Vol. 81. – P. 74–84. doi: 10.1016/j.firesaf.2016.01.011
13. Fan, F. Effects of inorganic fillers on the shear viscosity and fire retardant performance of waterborne intumescent coatings [Text] / F. Fan, Z. Xia, Q. Li, Z. Li // Progress in Organic Coatings. – 2013. – Vol. 76, Issue 5. – P. 844–851. doi: 10.1016/j.porgcoat.2013.02.002
14. Терещев, В. В. Расчет параметров развития и тушения пожаров [Текст] / В. В. Терещев. – Екатеринбург: изд. Калан, 2011. – 460 с.
15. Тихонов, В. Н. Аналитическая химия магния [Текст] / В. Н. Тихонов. – М.: Изд-во “Наука”, 1973. – 254 с.